

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 62-83:621.313.33

5.1. КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В СРЕДЕ ANSYS

COMPLEX MODEL OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES WITH ANSYS SOFTWARE

Зюзов Анатолий Михайлович, д-р техн. наук, профессор каф. Электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru, Тел.: +79126348363

Метельков Владимир Павлович канд. техн. наук, доцент каф. Электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru, Тел.: +79122849061

Бубнов Матвей Владимирович, студент каф. Электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: 11r@gmx.us

Клявлин Алексей Егорович, инженер технической поддержки ООО «Делкам-Урал», Россия, 6200131, г. Екатеринбург, ул. Metallurgov, 16-б. E-mail: kae@delcam-ural.ru

Anatoliy M. Zyuzev, Doctor Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru, Ph.: +79126348363

Vladimir P. Metelkov, Cand. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru, Ph.: +79122849061

Matvei V. Bubnov, Student of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: 11r@gmx.us

Aleksey E. Klyavlin, Technical Support Engineer of «Delcam-Ural», 6200131, Metallurgov street, 16-b, Ekaterinburg, Russia. E-mail: kae@delcam-ural.ru

Аннотация: В работе рассматриваются особенности построения комплексной модели асинхронного электропривода с тиристорным преобразователем напряжения с использованием программных средств ANSYS и представлены результаты моделирования

Abstract: The paper discusses the features of the construction of a complex model of the asynchronous electric drive with thyristor voltage converter using ANSYS software and modeling results are represented.

Ключевые слова: модель; асинхронный двигатель; ANSYS; тиристорный преобразователь напряжения.

Key words: model; asynchronous motor; ANSYS; thyristor voltage converter.

Возрастающие требования к эффективности отдельных составляющих современного электропривода, а также к эффективности в целом электропривода, как электротехнического комплекса, требуют все более полного учета особенностей электродинамических, термодинамических и механических процессов в силовом канале от сети до механизма. Это приводит к переходу на новый уровень сложности решаемых задач конструирования, управления и эксплуатации электропривода (включая задачи диагностики и защиты), на котором уже не работают простейшие аналитические методы, связанные с существенной идеализацией объекта исследования. Очевидно, только современные подходы, основанные на использовании в

исследовательской практике математических моделей электроприводов, достаточно полно учитывающих разнообразные особенности их работы, позволяют принимать оптимальные решения на этапе проектных исследований и эксплуатации. Таким образом, создание компьютерных программ, базирующихся на модельном подходе и позволяющих решать множество сложных инженерных задач, начиная от проектирования до проблем диагностики его состояния в ходе эксплуатации, является весьма актуальной задачей.

Отдельно следует отметить тесную связь и взаимовлияние друг на друга отдельных составляющих электропривода, которые весьма сложно учесть без использования моделирования.

Например, неоднократно отмечалась взаимозависимость задачи оценки теплового состояния электрической машины с особенностями функционирования полупроводниковых преобразователей для ее питания [1,2,3], в частности, увеличение потерь в двигателе при использовании широтно-импульсной модуляции [4,5]. Также необходимо отметить важность модельного подхода для адекватного отображения процессов, происходящих в сложной механической части некоторых современных электроприводов, например, моделирование волновых явлений в пространственно-распределенных механических системах [6,7].

Отметим, что значительную актуальность имеет создание моделей для асинхронных электроприводов, поскольку количество используемых асинхронных двигателей (АД) общего назначения составляют около 90% от всех используемых двигателей и они потребляют около 40% вырабатываемой в стране энергии [8]. В общем случае комплексная модель асинхронного электропривода может включать в себя следующие блоки (следуя по направлению потока энергии):

- модель питающей сети;
- модель преобразовательного агрегата (тиристорный преобразователь напряжения или

преобразователь частоты) с моделью системы управления;

- электродинамическую модель АД;
- энергетическую модель АД;
- термодинамическую модель АД и модель изменения ресурса изоляции обмоток;
- модель механической части привода;
- деформационно-силовые модели двигателя и механической части привода.

Блочное построение комплексной модели создает возможность формировать отдельные блоки на различном уровне детализации в соответствии с потребностями решаемой задачи. Это позволяет избежать вычислительных сложностей, связанных с отличающимся на несколько порядков темпом протекания процессов в различных блоках модели и ограничиться доступным уровнем вычислительных возможностей.

На кафедре Электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета ведется работа по созданию программных средств научно-исследовательского, проектного и учебного назначения в области моделирования электроприводов технологических агрегатов и комплексов. Здесь рассмотрен один из примеров построения комплексной модели электропривода с использованием программных средств ANSYS (рис. 1).

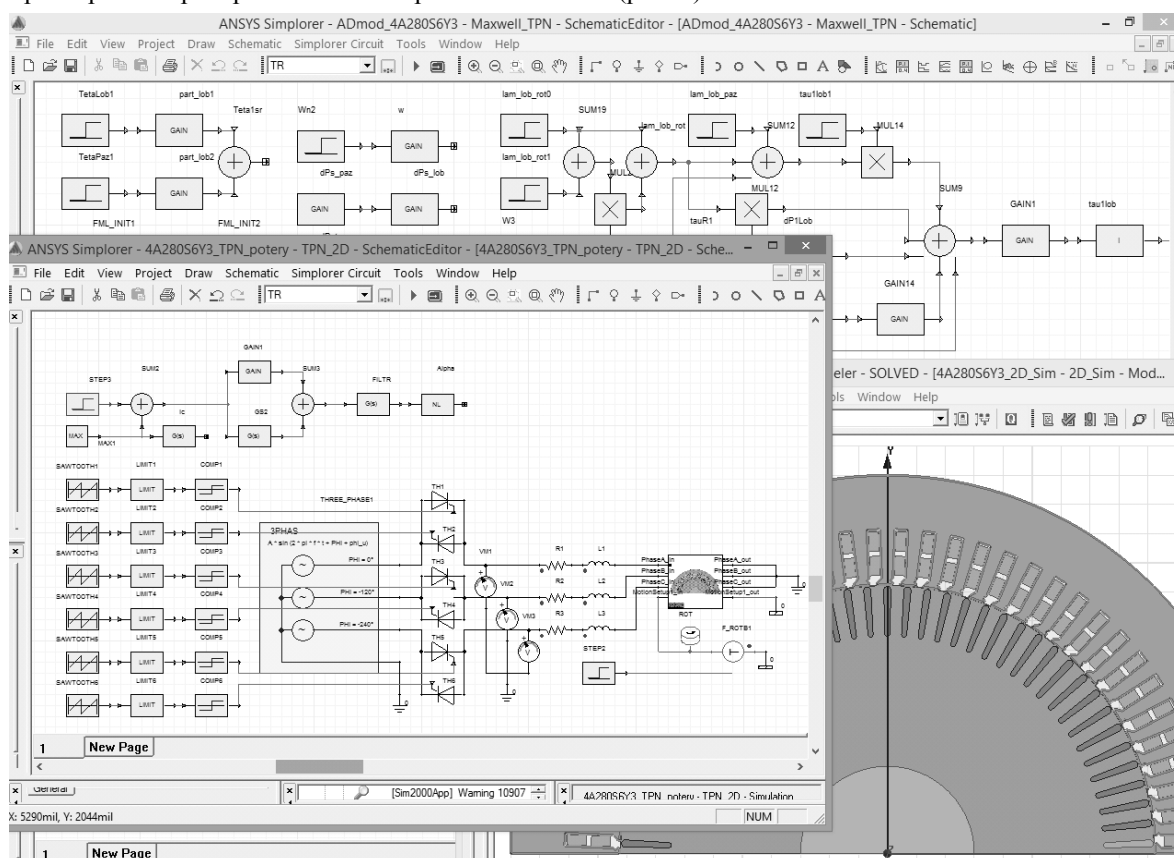


Рис. 1. Общий вид компонентов комплексной модели в ANSYS

В практике моделирования электроприводов широко используется математическая модель асинхронного двигателя, записанная в обобщенных переменных, входящих в систему уравнений, представленную, например, в [9]. Эта модель дает возможность определить основные переменные, характеризующие состояние двигателя, но предполагает наличие существенных допущений, связанных с идеализацией АД. Поэтому она в принципе не позволяет решить задачи, требующие учета не синусоидального распределения магнитодвижущей силы в зазоре, расчета динамических усилий, возникающих в элементах конструкции двигателя, в частности, в лобовых частях и в стержнях ротора, оценки влияния высших гармоник, что особенно актуально в случае питания двигателя от полупроводниковых преобразователей различного типа, характеризующихся высоким уровнем высших гармонических в питающем напряжении.

Задачей данного исследования является создание на основе программного пакета ANSYS комплексной модели асинхронного электропривода с тиристорным преобразователем напряжения (ТПН), структура которой показана на рис. 2.

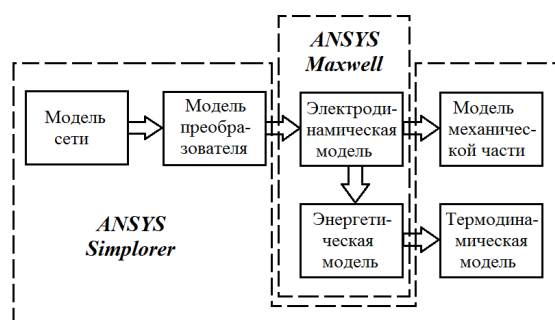


Рис. 2. Структура комплексной модели в ANSYS

Основным элементом комплексной модели является электродинамическая 2D-модель двигателя, полученная с помощью специального инструмента RMXprt из пакета ANSYS Maxwell. Такой способ моделирования в Maxwell является наиболее простым. В RMXprt требуется задать только основные технические параметры двигателя, такие как геометрические размеры его конструктивных элементов, материалы, номинальные данные (полный перечень таких параметров для двигателей серии 4A доступен в справочнике [8]). Из полученной RMXprt-модели Maxwell может автоматически построить конечно-элементную 2D или 3D модель двигателя. Сборка основной схемы модели осуществляется в ANSYS Simplorer из стандартных функциональных блоков: источника трехфазного синусоидального напряжения, тиристорных ключей, образующих схему ТПН, модели СИФУ, включающей в себя

блоки источника пилообразного сигнала и компараторы для управления каждым тиристором. Так же из стандартных блоков построена система управления, замкнутая по току статора, содержащая ПИ-регулятор тока. Выходом системы управления является задание на угол открытия вентилей ТПН. Механическая часть, в данном случае, представлена жестким приведенным звеном с вентиляторным моментом нагрузки. Помимо этого, в состав комплексной модели входит термодинамическая модель двигателя, сформированная на основе 6-ти массовой тепловой схемы замещения двигателя, использующая данные по потерям, поступающим из Maxwell.

Использовались следующие параметры модели: амплитуда напряжения сети 310 В; частота 50 Гц; двигатель 4A280S6Y3 (номинальная мощность $P_N = 75$ кВт, число пар полюсов $p = 3$, номинальное скольжение $s_N = 0,02$); момент сопротивления $M_C = M_N \omega^2 / \omega_N^2 = 7,09 \omega^2$; дополнительный момент инерции $2,68$ кг·м², равный моменту инерции двигателя. В системе управления использовался ПИ-регулятор (с коэффициентом пропорционального канала $k_p = 1,5$ и коэффициентом интегрального канала $k_i = 8,33 \cdot 10^{-3}$).

На рис. 3 показаны диаграммы момента и скорости двигателя при пуске «под отсечку». В качестве задания в модели используется амплитуда фазного тока: $I^* = 4I_{smN} = 4\sqrt{2}I_{sN} = 785$ А. Установившаяся скорость на рис. 3 равна 103 рад/с при моменте 730 Н·м.

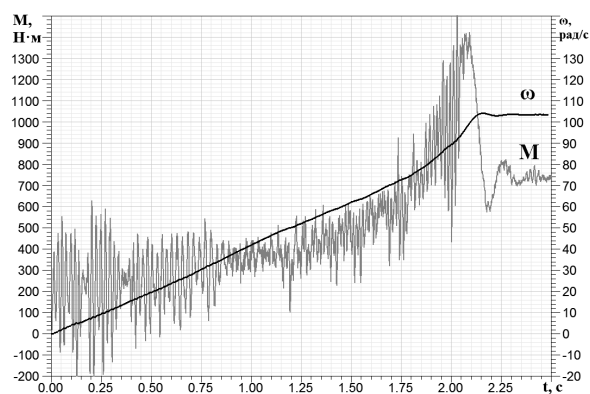


Рис. 3. Момент и скорость двигателя

Так как в обратную связь заводится максимальная амплитуда тока по трем фазам статора, а сам ток при питании двигателя от ТПН имеет несинусоидальную форму, то график амплитуды тока имеет существенные колебания. На рис. 4 показана временная зависимость амплитуды тока статора после фильтра с постоянной времени 0,05 с. Пусковой ток имеет амплитуду 785 А,

установившийся – 186 А. Помимо тока на рис. 4 показано изменение угла открытия тириستоров α .

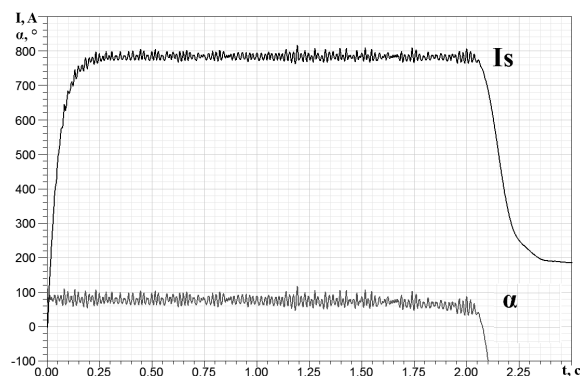


Рис. 4. Амплитуда тока и угол открытия вентилей

Конечно-элементная модель двигателя в Maxwell в варианте 2D позволяет существенно сократить время расчета по сравнению с 3D моделью, что очень существенно при учете весьма ограниченных вычислительных возможностей персональных компьютеров. При использовании 2D модели, не содержащей лобовых частей обмоток, потери в них могут быть рассчитаны аналитически по потерям, выделяющимся в пазовых частях с учетом их доли в длине витка обмотки. Полученные таким образом результаты передаются в термодинамическую модель в Simplorer, в котором и выполняется расчёт

температуры элементов двигателя. На рис. 5 показано изменение температуры пазовой части обмотки статора двигателя в процессе пуска. Практически линейное во времени изменение температуры объясняется сравнительно короткой продолжительностью пуска по сравнению с величинами постоянных времени термодинамической модели этого двигателя.

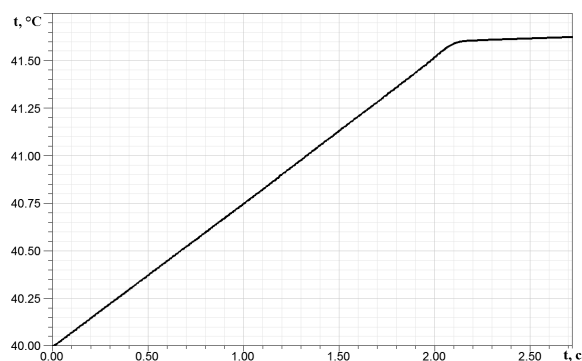


Рис. 5. Температура пазовой части обмотки статора двигателя

В заключение отметим, что в планах развития работы ставятся задачи по изучению динамических усилий, возникающих в элементах конструкции двигателя в процессе пуска и регулирования скорости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boglietti, A. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines / A. Boglietti; Cavagnino A.; D. Staton; M. Shanel; M. Mueller; C. Mejuto // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. Vol. 56 no. 3, pp. 871-882.
2. Nelson J. J., Venkataramanan G., El-Refaie A. M. Fast thermal profiling of power semiconductor devices using Fourier techniques // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006. Vol. 53, no. 2, pp. 521-529.
3. Gao, Z. A sensorless rotor temperature estimator for induction machines based on a current harmonic spectral estimation scheme / Z. Gao, T. G. Habetler, R. G. Harley, R. S. Colby // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, no. 1, pp. 407-416.
4. Champenois G., Roze D., Zhu D.S. Electrical and thermal performance predictions in inverter-fed squirrel-cage induction motor drives // Electric Machines and Power Systems. 1994. Vol. 22, no. 3, pp. 355-369.
5. Boys J. T., Miles M. J. Empirical thermal model for inverter-driven cage induction machines // Proc. Inst. Elect. Eng. Electric Power Applications. 1995. Vol. 141, no. 6, pp. 360-372.
6. Зюзев, А.М. Программный комплекс для исследования эксплуатационных режимов электроприводов буровых установок / А.М. Зюзев, В.М. Липанов, В.П. Метельков, В.Н. Поляков, А.С. Попов, В.Ф. Шутько // Электротехника. 2003. № 7. С. 25-31.
7. Зюзев А.М., Метельков В.П., Попов А.С. Программный моделирующий комплекс "Электропривод станка-качалки с асинхронным двигателем" ("ЭСКаДа") // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612481. Российское агентство по патентам и товарным знакам. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12 ноября 2003 г.
8. Кравчик, А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
9. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.